

20英寸PMT光学模型

姓 名：王耀光

合作导师：温良剑 研究员

部 门：实验物理中心

高能所博士后学术交流会

2022.06.30

江门中微子实验

- Jiangmen **U**nderground **N**eutrino **O**bservatory (**JUNO**)

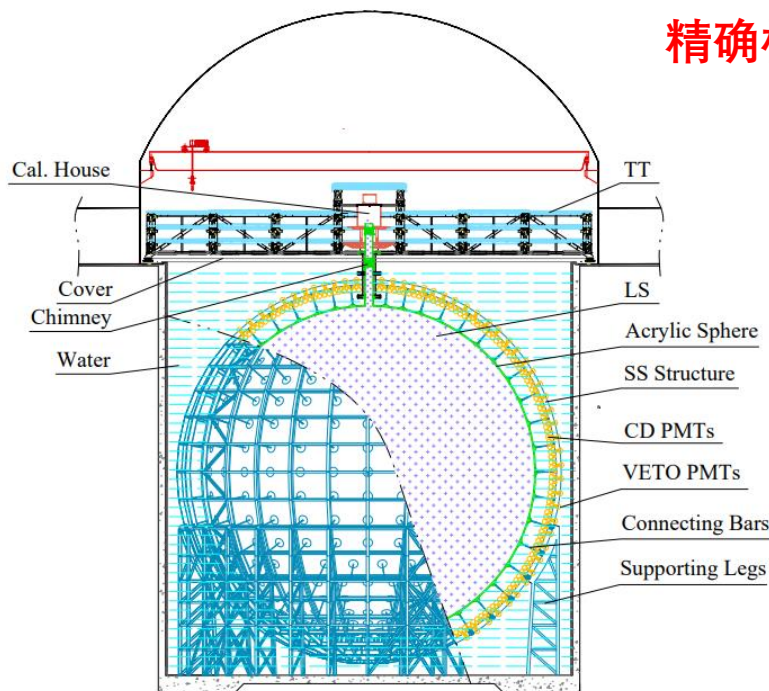
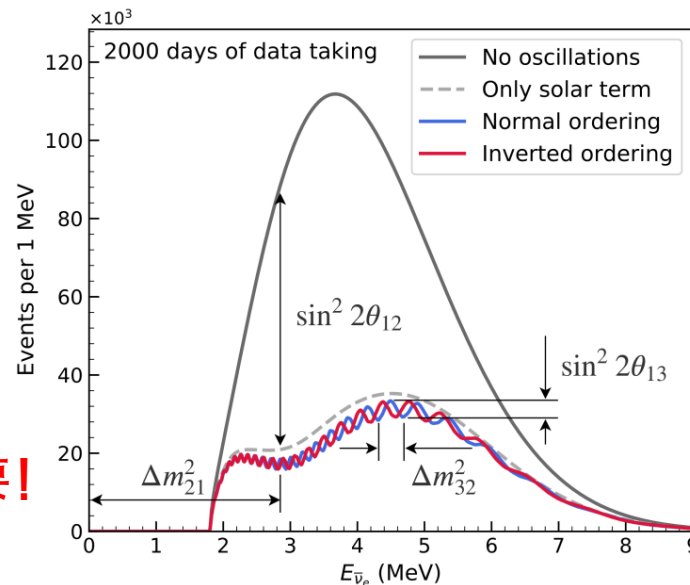
- 物理目标：精确测量中微子质量顺序

- 反贝塔衰变： $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

- 能量分辨率： $< 3\% @ 1 \text{ MeV}$

- 测量方法：液体闪烁体+光电倍增管

精确模拟至关重要！



HPK dynode-PMT

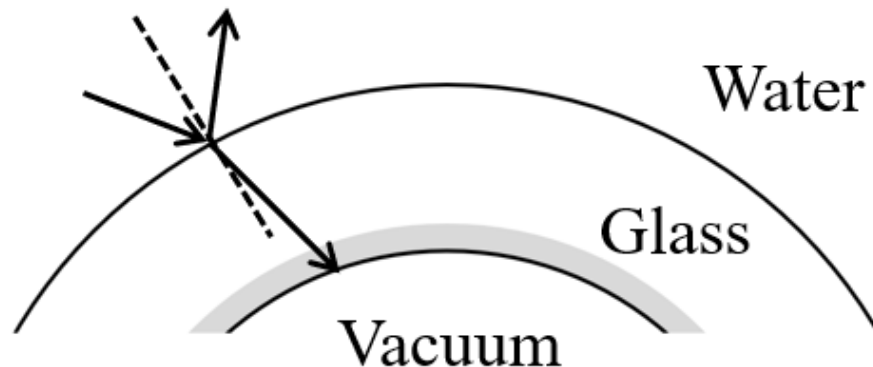


NNVT MCP-PMT

旧PMT光学模型

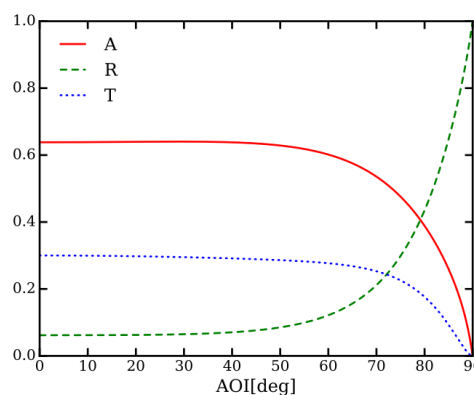
• 旧PMT光学模型工作原理:

- 水-玻璃界面反射效应
- 击中光阴极的光子全部被吸收
- 根据量子效率(QE)和收集效率(CE)抽样, 判断是否产生击中

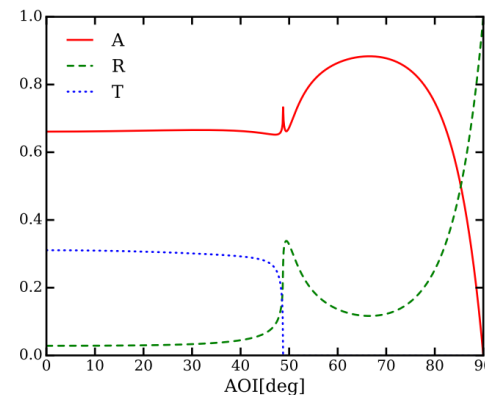


• 旧PMT光学模型缺陷:

- 忽略了效率的入射角依赖
- 光阴极的薄膜干涉效应
- 光阴极的反射
- 透射光在内部的光学过程



PMT in air



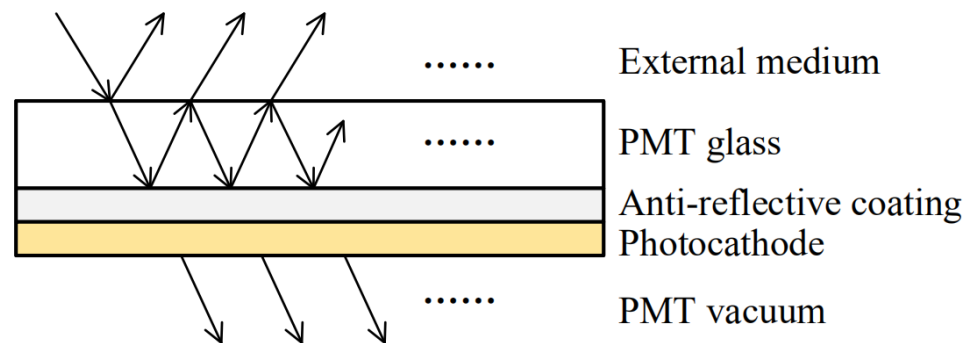
PMT in water

◆ 理论计算表明, PMT工作在水中时, 会在光阴极和真空之间发生全反射, 导致PMT探测效率提高

新PMT光学模型

• PMT玻壳结构

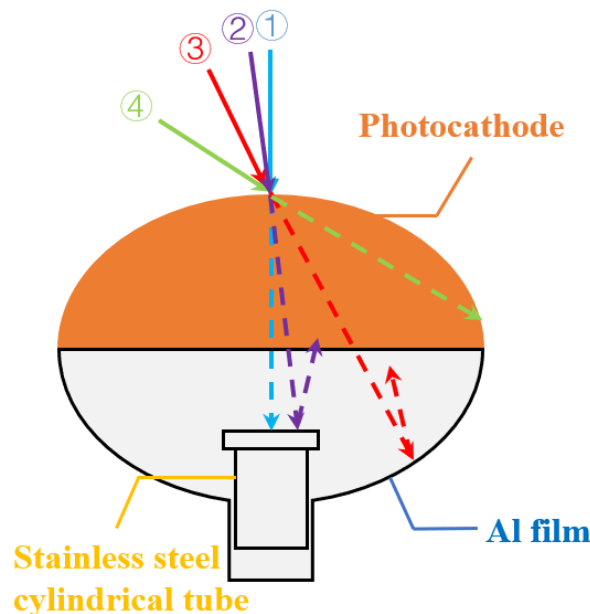
- 外部介质-玻璃-增透膜-光阴极-真空
- 增透膜和光阴极为薄膜介质，需考虑干涉效应
- 介质间的多次反射



✓ 多层薄膜介质光学理论

• PMT内部光学过程

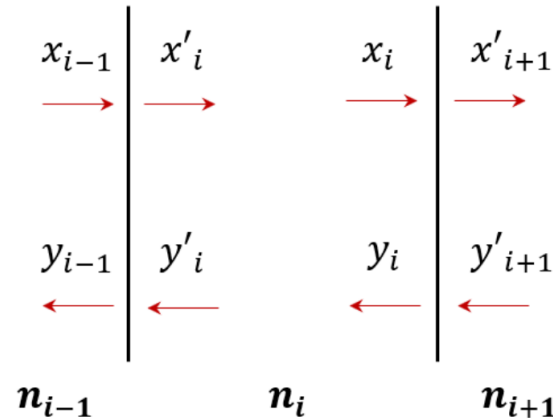
- ① 打拿极/微通道板，无反射
- ② 金属筒封装结构反射
- ③ 背部铝膜反射
- ④ 透射光直接击中光阴极



✓ 借助GEANT4进行光子追踪

Transfer Matrix Method (TMM)

- 相邻两层介质间的反射效应由斯涅尔定律和菲涅尔公式给出



- 多层介质间的反射及传播可由矩阵方法确定

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = m_{0 \rightarrow 1} \prod_{i=1}^N p_i m_{i \rightarrow i+1} \begin{pmatrix} x'_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{m}_{00} & \tilde{m}_{01} \\ \tilde{m}_{10} & \tilde{m}_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \tilde{m} \begin{pmatrix} x'_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \left[\begin{array}{l} r = \frac{y_0}{x_0} = \frac{\tilde{m}_{10}}{\tilde{m}_{00}} \\ t = \frac{x'_{N+1}}{x_0} = \frac{1}{\tilde{m}_{00}} \end{array} \right]$$

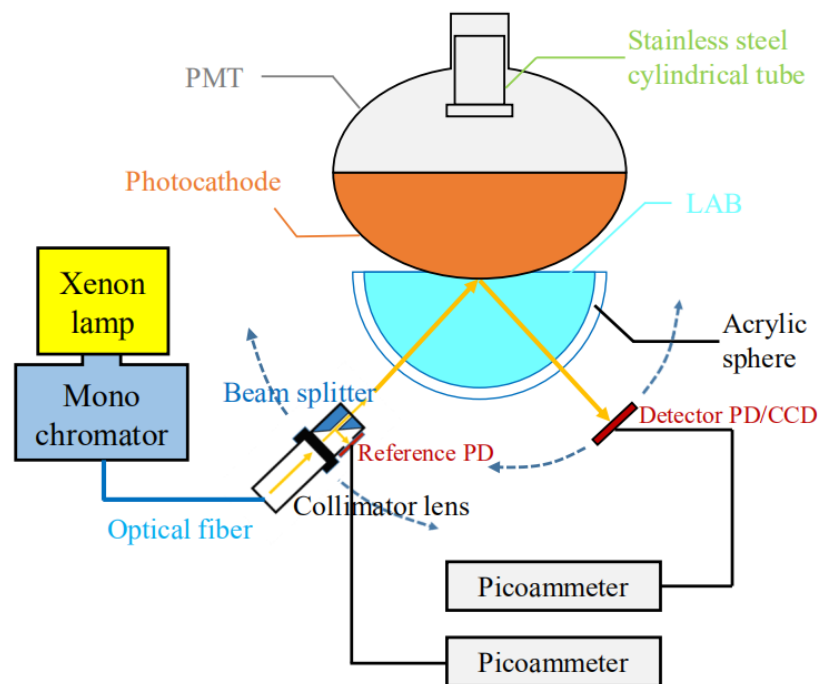
m : 透过矩阵, p : 传播矩阵

◆ 开发了具有多层膜计算功能的软件包, 可计算任意层数介质的反射、透过和吸收

实验测量

• 反射率测量

- **PMT**顶端浸泡在**LAB**中
- 光源: Xe灯+单色仪, 390~500 nm
- 入射角: 15~75度
- 三种类型**20英寸PMT**:
 - HPK dynode-PMT
 - NNVT MCP-PMT
 - NNVT HQE-MCP-PMT
- 拟合反射率曲线, 获取关键参数
 - 增透膜、光阴极的**折射率**及**厚度**



• 量子效率测量

- 结合QE曲线, 提取PMT内各个部件的反射率
- 验证全反射效应导致的QE升高

反射率分析

• 不同波长数据联合拟合

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j \left(\frac{R_{\text{theo}}(\lambda_i, \theta_j, \delta, n_0[i], n_1[i], k_1[i], d_1, n_2[i], k_2[i], d_2) - R_{\text{exp}}}{\sigma_R} \right)^2$$

δ : angle shift

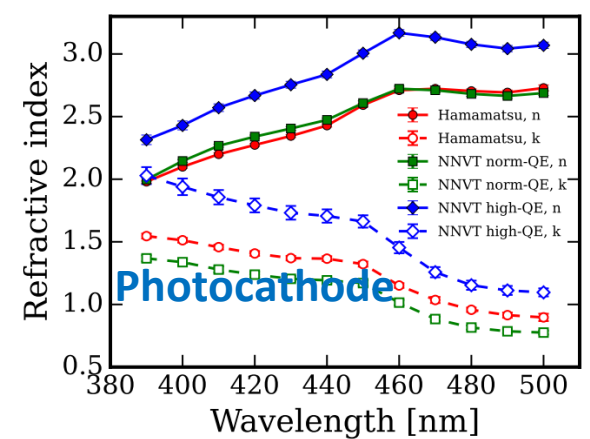
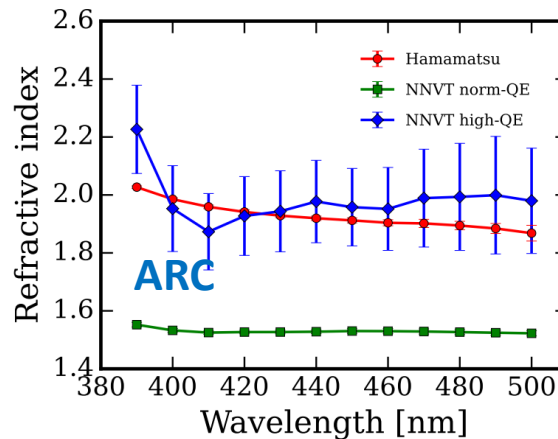
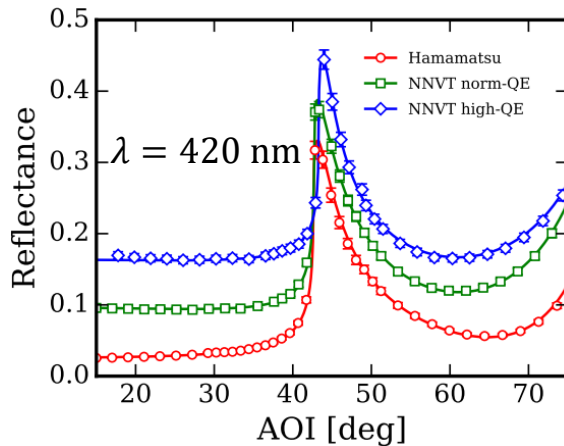
d_1 : thickness of AR coating

d_2 : thickness of photocathode

n_0 : refractive index of LAB

n_1, k_1 : refractive index of ARC

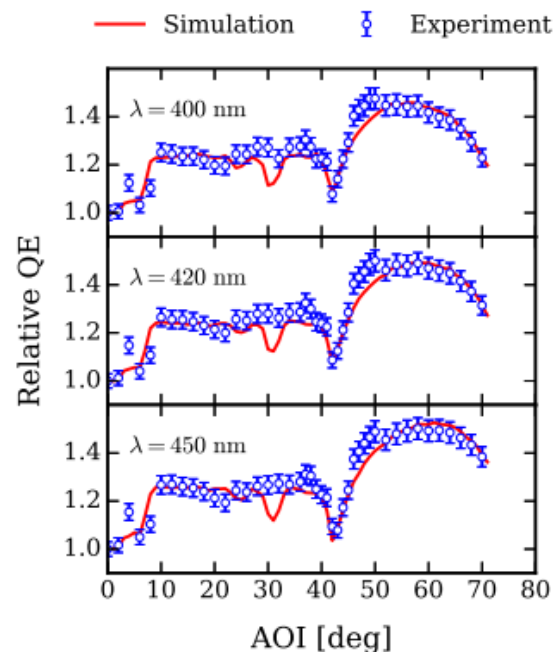
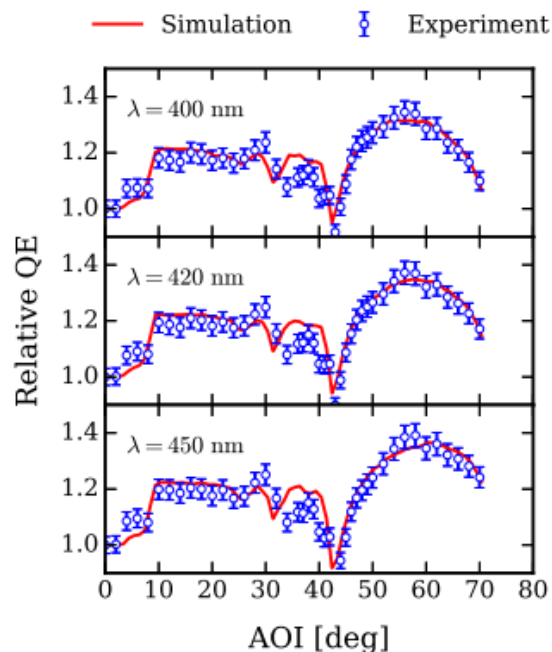
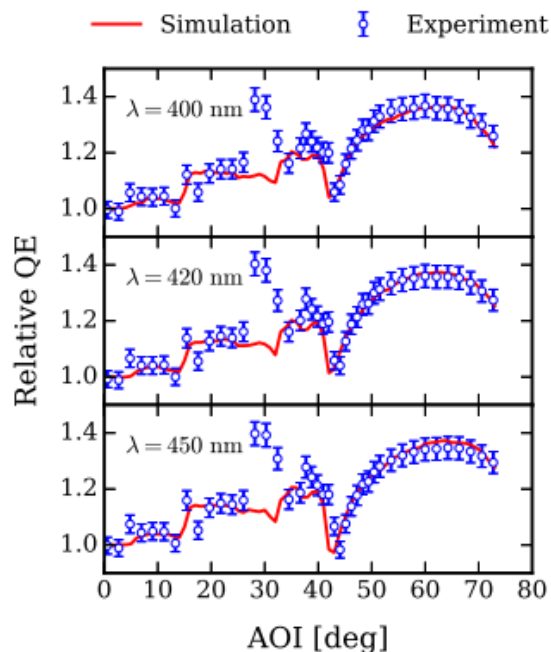
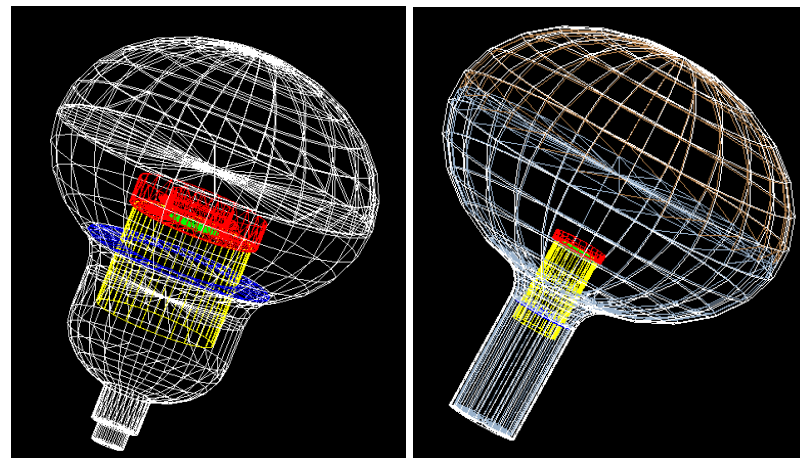
n_2, k_2 : refractive index of photocathode



Thickness [nm]	HPK dynode-PMT	NNVT HQE-MCP-PMT	NNVT MCP-PMT
ARC	32.6 ± 0.5	6.3 ± 1.3	26.5 ± 8.4
Photocathode	20.8 ± 0.2	19.0 ± 0.4	20.3 ± 0.2

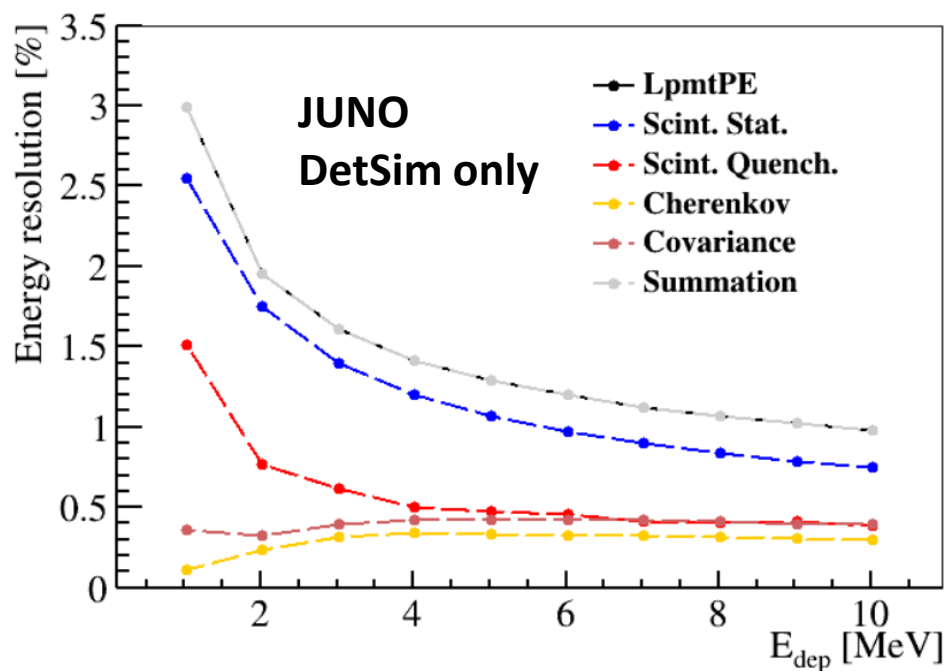
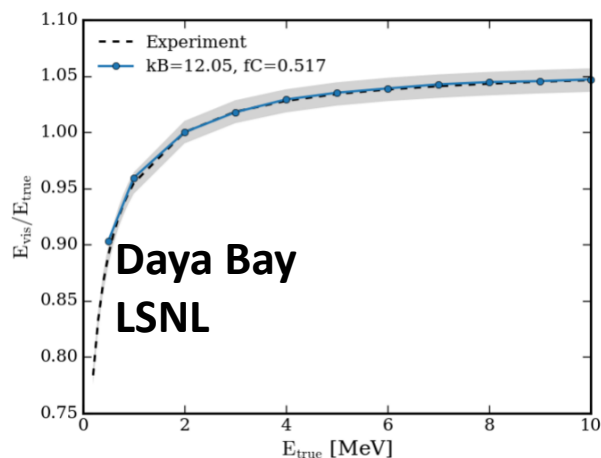
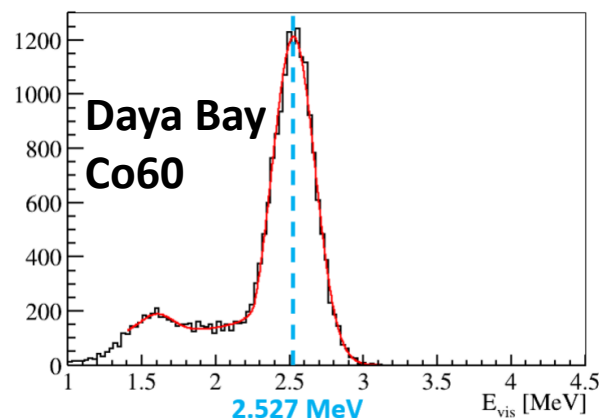
QE角度响应及其模拟

- 构造详细的PMT几何
- 使用QE数据约束内部结构的反射率
- 增透膜和光阴极定义为玻壳和真空之间的Optical Surface
- 自定义薄膜光学过程



对JUNO能量分辨率影响

- 结合新PMT光学模型、液闪淬灭因子和折射率，对Daya Bay实验的能标和能量分辨率进行了重新研究
- 为JUNO的探测器模拟提供了新的标准参数，及最新分辨率结果



- 基于新PMT光学模型以及新模拟参数的能量分辨率结果在Neutrino 2022国际会议进行了汇报

中微子实验的“光产额之谜”

- 国际上多个大型中微子实验均观测到光产额超出（20%~30%）的现象，即实际光子数远高于预期值

实验	预期PE数/分辨率	实际光子数/分辨率	超出比例
Borexino	400 p.e./MeV	500 p.e./MeV	25%
Daya Bay (Prototype)	200 p.e./MeV	240 p.e./MeV	20%
Daya Bay	134 p.e./MeV	162 p.e./MeV	21%
KamLAND	150 p.e./MeV	280 p.e./MeV	80% (重发射&散射)
RENO	$6.5\%/\sqrt{E}$	$5.9\%/\sqrt{E}$	21%

- 与新PMT光学模型预期一致，主要由PMT角度响应及反射导致

Effect \ PMT type	Hamamatsu	NNVT normal-QE	NNVT high-QE
PDE angular response	11.8%	16.0%	8.9%
Reflection	9.5%	14.0%	20.3%
Total	21.3%	30.0%	29.2%

总结

- 结合理论计算、GEANT4模拟和实验测量，建立了完整的PMT光学模型
 - PMT角度响应、光阴极反射、PMT内部光学过程
- 通过PMT反射率测量，提取出模拟所需关键参数
 - 增透膜和光阴极的折射率、厚度信息
- 将新PMT光学模型应用至Daya Bay实验，结合能标及能量非线性数据，重新约束了探测器模拟中的液闪光产额
- 为JUNO提供了标准模拟参数，并据此给出了最新的能量分辨率结果
- 可以合理解释国际上大多数中微子实验中的“光产额之谜”
 - 2021年JUNO国际科学顾问委员会亮点工作
 - 相关工作发表至： *Eur. Phys. J. C* 82, 329 (2022)